



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY

2026年第十届CSNS白光中子实验装置用户研讨会

湖南省 衡阳市 2026年7月14-16日

中子寿命测量



中子寿命疑难



天基测量方案



CSNS-TPC探测

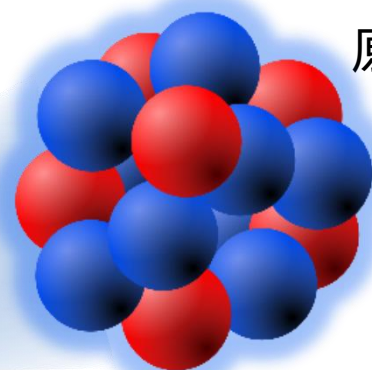
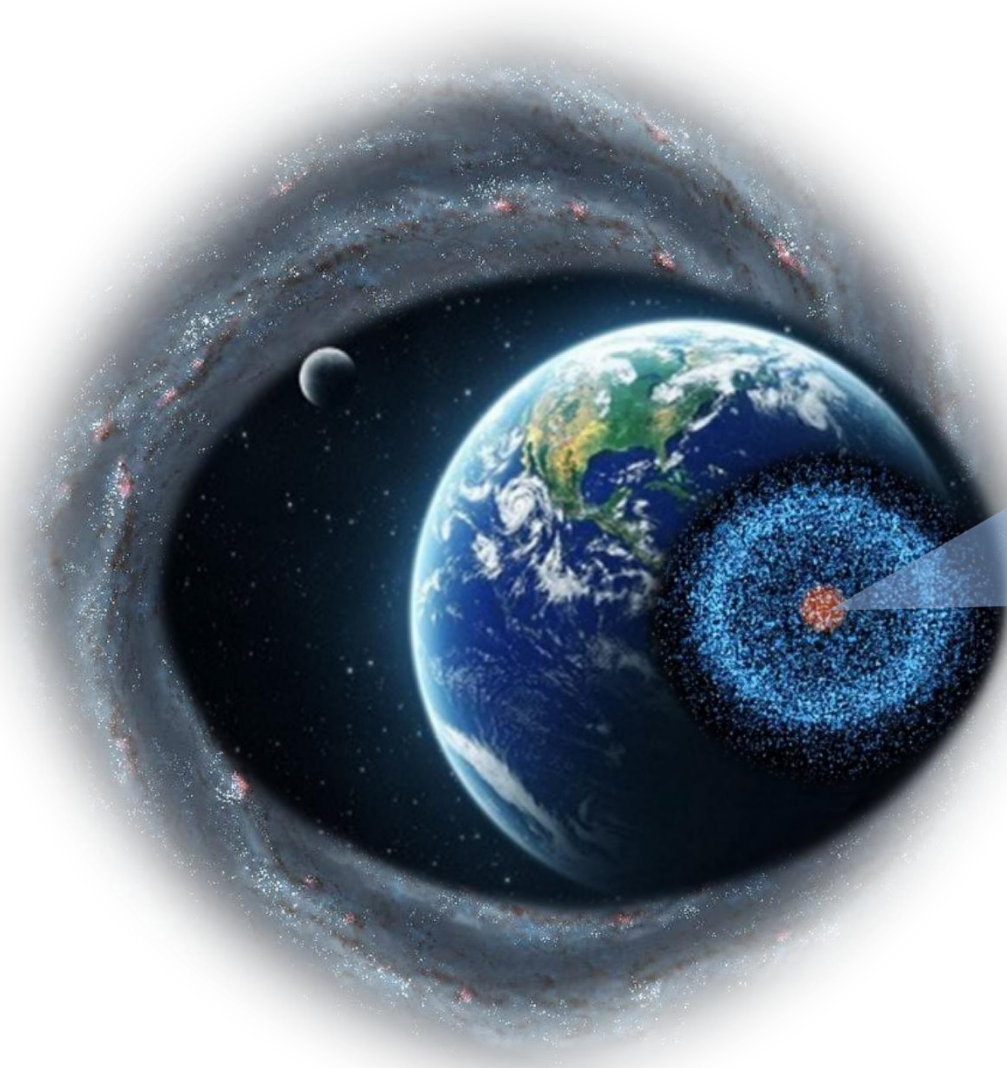
孙保华 / StarNeutronix 合作组

bhsun@buaa.edu.cn

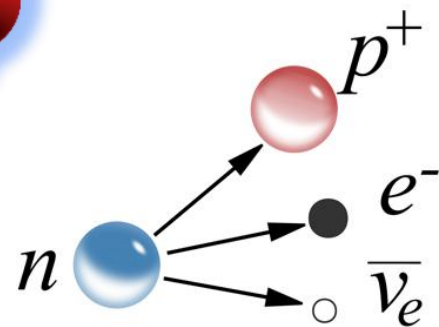
北京航空航天大学物理学院



中子：组成我们可见物质世界的组分之一



原子核



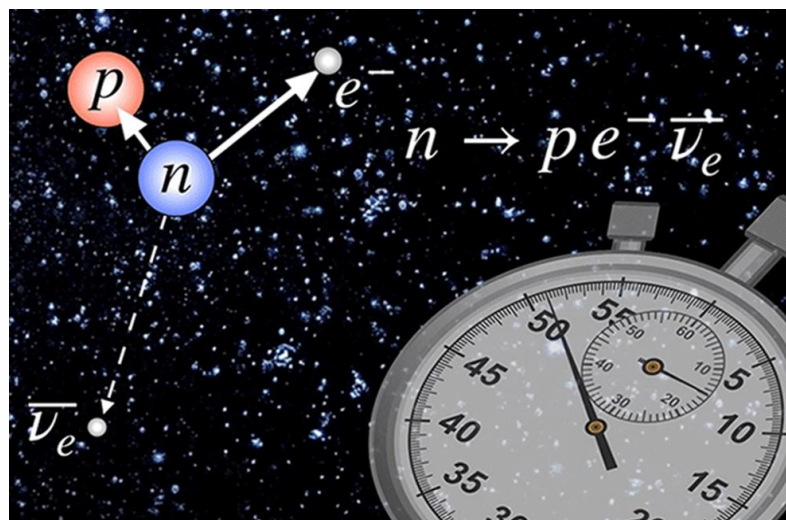
自由的中子会在900秒左右衰变为
一个质子、一个电子和一个反中微子



中子寿命是粒子物理学和宇宙学中的基本参数

验证粒子物理的标准模型：**弱相互作用耦合常数**

最简单、最纯粹的
弱相互作用(β^-)衰变



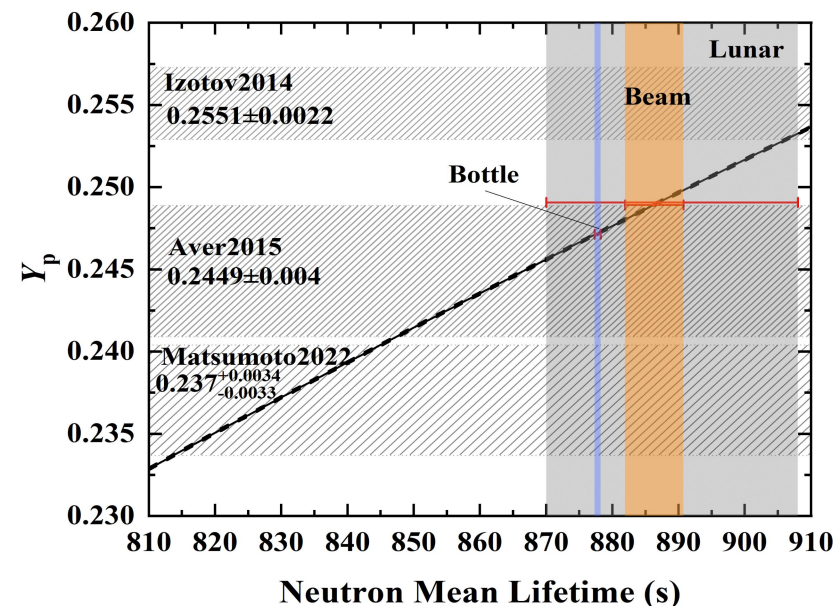
$$\tau_n = \frac{2\pi^3 \hbar^7}{(G_V^2 + 3G_A^2)m_e^5 c^4 f_R} \sim 15 \text{ mins}$$

G_V : 矢量耦合常数

G_A : 轴矢量耦合常数

检验宇宙早期演化的**大爆炸理论**，影响后期元素演化

宇宙中形成的第一批原子核
宇宙的演化历史



$t \sim 1$ 秒, 核子冻结, 中子质子比 $Y_n/Y_p \sim 1/6$

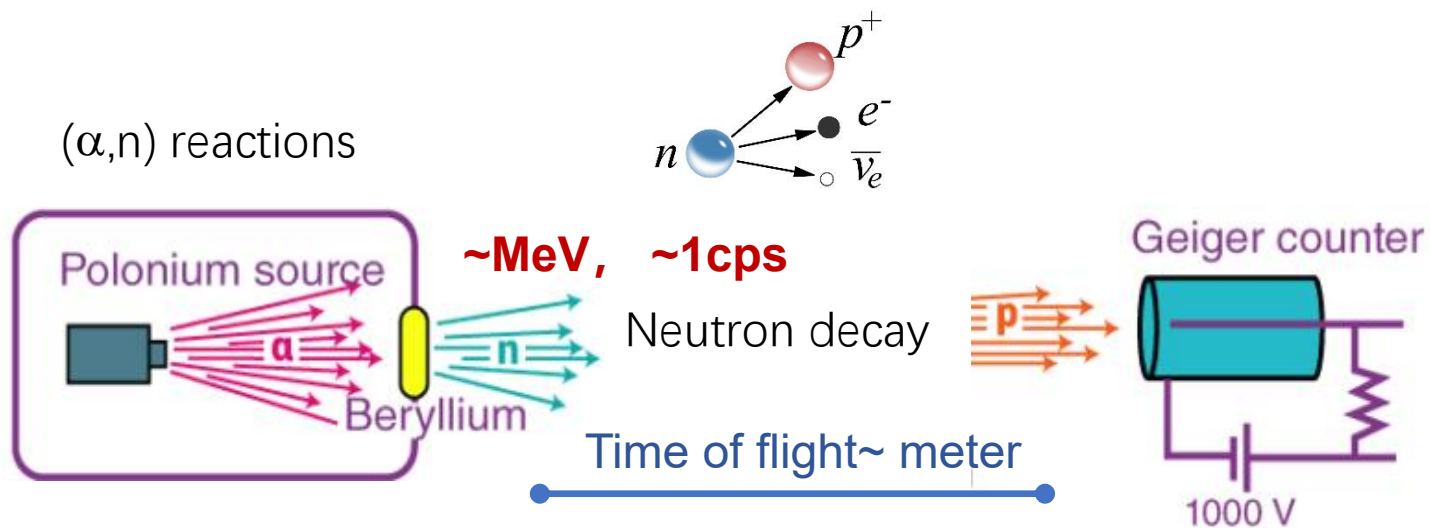
$t \sim 3$ 分钟时, 中子全部结合成轻核素

^4He 丰度与中子寿命存在显著关联

中子寿命测量



Chadwick



难点:

1、**中子源强度低 (1 n/s)** , 2、衰变比例低(10^{-10}), 3、中子探测效率低 (能量高 $\sim 10^7 \text{ m/s}$) 4、**探测器本底高**

解决途径:

- 提高中子流强
- 降低中子速度
- 提高**信噪比**

40年代

回旋加速器 10^6 n/s

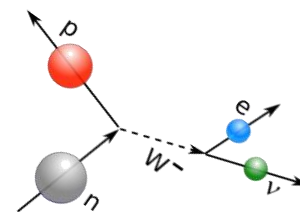
成功慢化 ($0.025 \text{ eV} \sim 2.2 \text{ km/s}$)

如何确定中子的衰变信号

统计误差巨大

损失方向信息

简单的计数功能



首个中子寿命测量: 1950s'

➤ thermal neutron flux



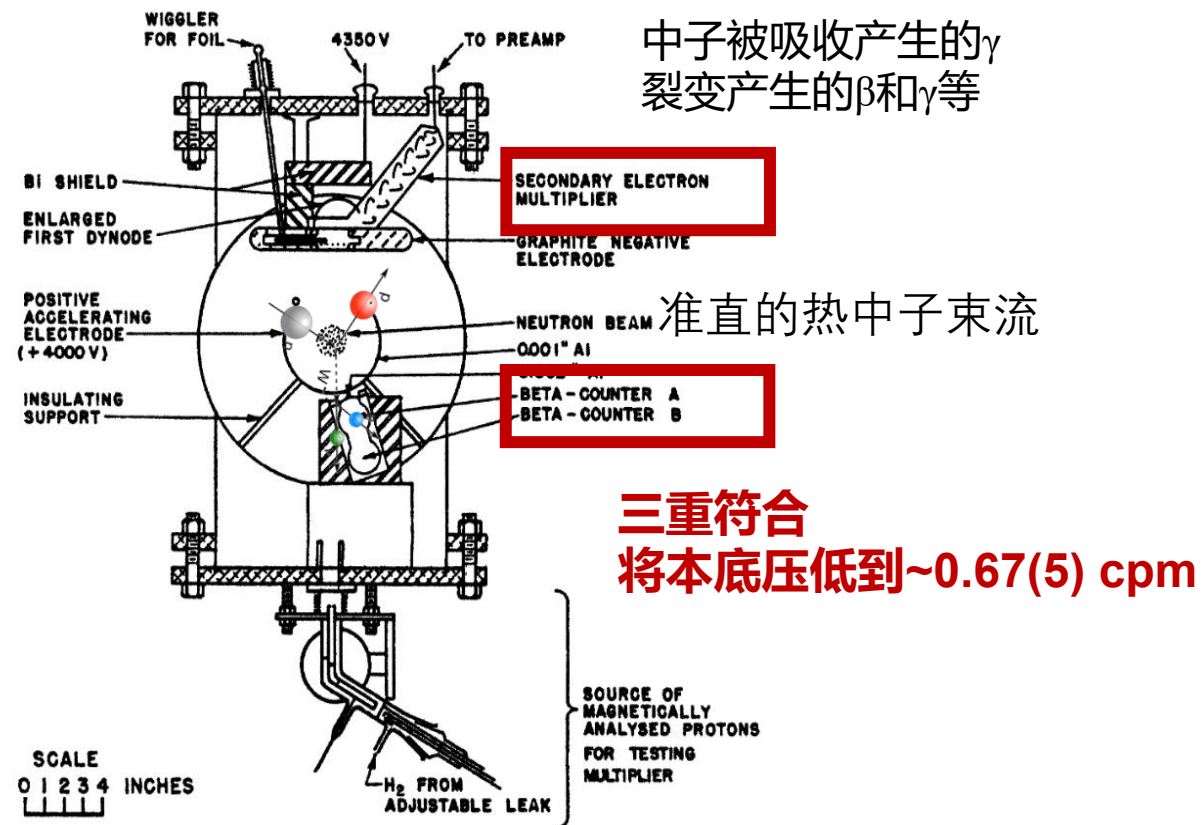
橡树岭国家实验室

3.5MW X-10石墨反应堆

$10^{12} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ (堆芯)

$10^3 \text{ n/cm}^3/\text{s}$ (估算束流强度)

➤ 挑战: 本底 background rejection/ suppression



Apparatus for the first detection of coincident e^- and p from neutron decay

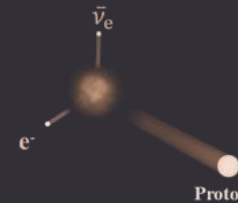
“Radioactive decay of neutron”

Snell, A. H., F. Pleasonton, and R. V. McCord, **1950**, *Phys. Rev.* **78**, 310. **10-30 min**

Robson, J., **1950**, *Phys. Rev.* **78**, 311. **9-25 min**

Robson, J. M., 1951, *Phys. Rev.* **83, 349. (半衰期) $12.8 \pm 2.5 \text{ min}$**

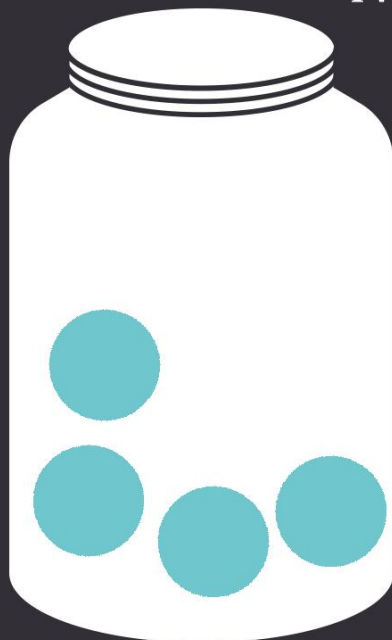
中子寿命测量方法



瓶方法 Bottle method

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{-(t_1-t_2)/\tau}$$

$v_n \sim 1 \text{ m/s}$



相对测量

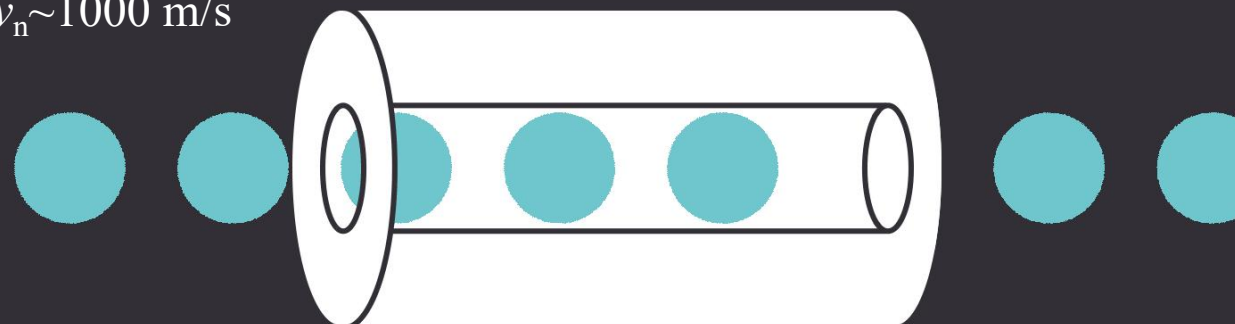
把超冷中子束缚在一个瓶子结构的容器中，分别统计刚束缚时以及一段时间（~中子半衰期）之后的中子数，对中子进行相对测量。

Count the missing neutrons

束方法 Beam method

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{N}{\tau}$$

$v_n \sim 1000 \text{ m/s}$



绝对测量

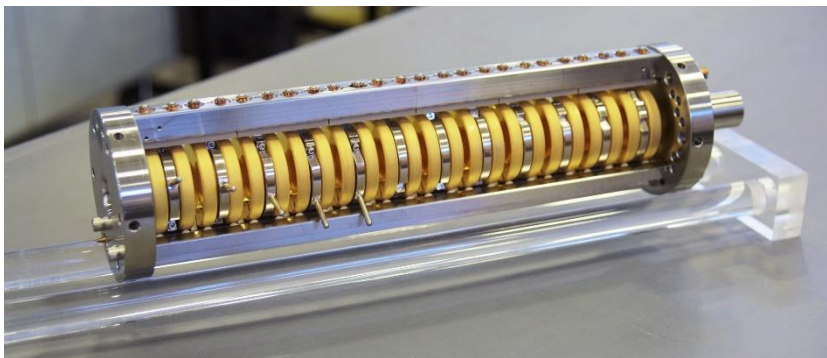
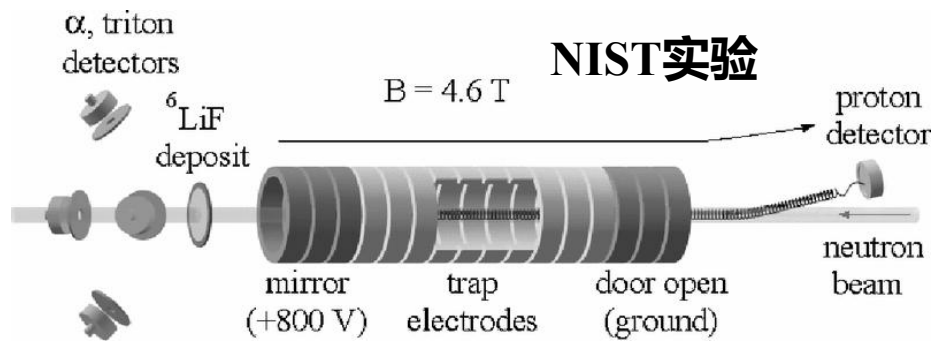
测量冷中子束通过一个限定空间衰变的总次数，对中子和衰变粒子（质子）进行绝对测量。

Count the decayed protons



中子寿命测量之“束实验”

$$\dot{N} = \frac{dN}{dT} = -\frac{N}{\tau_n} = -\frac{V\rho_n}{\tau_n}$$
$$\tau_n = \left(\frac{L}{\rho_{6Li}\sigma_n v_n} \right) \left(\frac{R_n}{R_p} \right) \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_n} \right)$$



Nico, et al., 2005, Phys. Rev. C 71, 055502

■ 重水反应堆1.4E9 n/cm²/s热中子, 40 K冷中子

- ⁶LiF监测中子束流 N
- 潘宁阱束缚衰变质子 (降低本底) $\dot{N}$
- 质子探测器测量

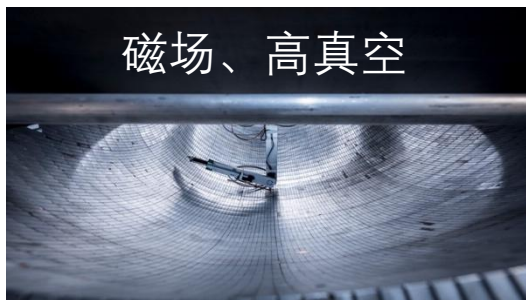
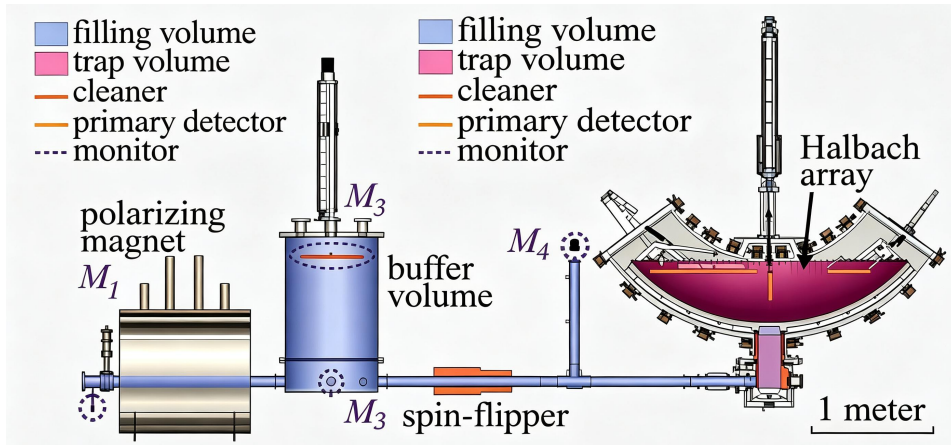
	中子寿命	误差
Robson, 1951	1110	220
Spivak et al., 1956	1040	130
D'Angelo, 1959	1100	160
Sosnovsky et al., 1959	1013	26
Christensen et al., 1972	918	14
Last et al., 1988	876	21
Spivak, 1988	891	9
Kossakowski et al., 1989	878	30
Byrne et al., 1996	889.2	4.8
Nico et al., 2005	886.3	3.4
Yue et al., 2013	887.7	2.2

14 mins 47.7 s

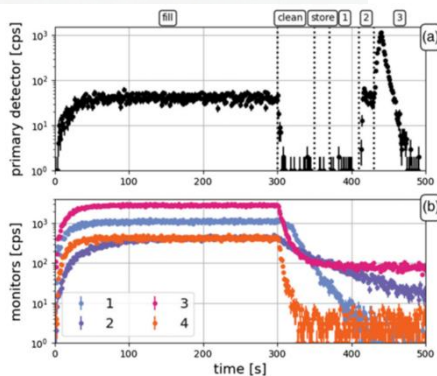


中子寿命测量之“瓶实验”

$$\tau = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln(N_1/N_2)}$$
$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_{cap}} + \frac{11}{\tau_{ine}} + \frac{1}{\tau_{other}}$$



磁场、高真空



优点：相对测量；**难点：**避免瓶子对中子的吸收

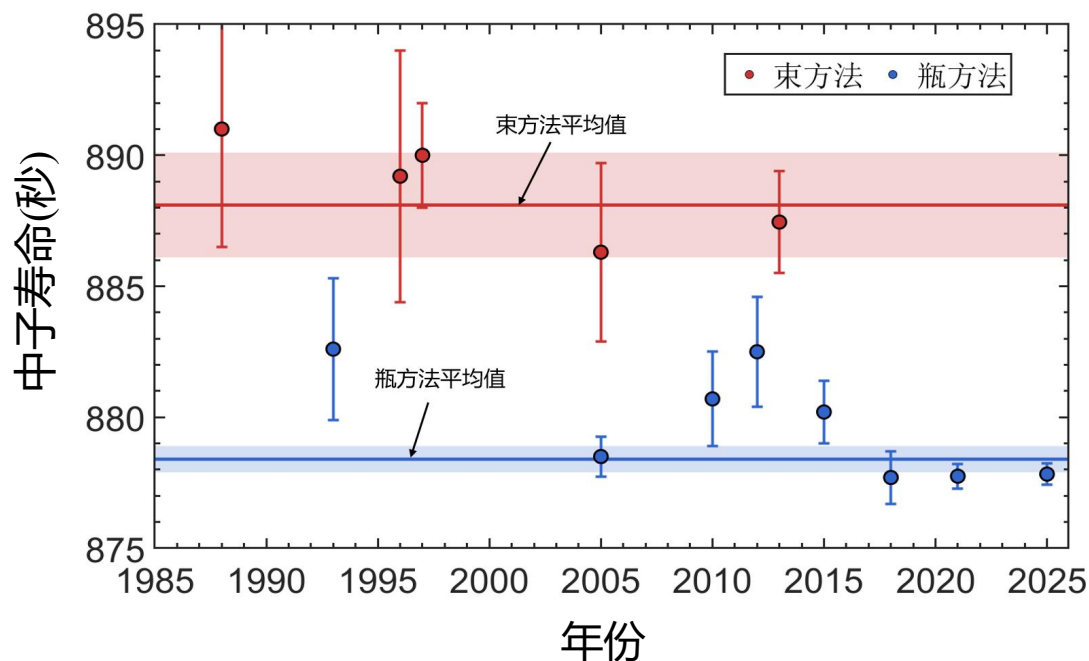
- 降低相互作用（高真空，超冷，<38 neV, 1 mK）
- 极化超冷中子（降低中子本底）束缚在磁场中
- ¹⁰B-coated-ZnS 中子测量

	中子寿命/s	误差/s
Kosvintsev et al., 1980	875	95
Kosvintsev, Morozov, and Terekhov, 1986	903	13
Morozov, 1989	893	20
Mampe et al., 1989	887.6	3
Alfimenkov et al., 1992	888.4	3.3
Mampe et al., 1993	882.6	2.7
Arzumanov et al., 2000	885.4	0.98
Serebrov et al., 2005	878.5	0.76
Pichlmaier et al., 2010	880.7	1.8
F. M. Gonzalez et al., 2021	877.75	0.35
R. Musedinovic et al., 2025	877.83	0.30

14 min 37.75 s



中子寿命疑难 Neutron lifetime puzzel



➤ 每种方法的精度逐步提升，误差<3s (系统误差主导)

束方法

测量衰变后的
质子

PRC 111, 045501 (2025)

Nature 598, 549 (2021)

PRL 127,172601(2021)

Science 360,627(2018)

PRL111,222501(2013)

瓶方法

测量中子

美国、法国、俄罗斯、日本

$$\Delta\tau = \tau_{\text{beam}} - \tau_{\text{bottle}} = (9.9 \pm 2.2) \text{ s}$$

❖ 现有两种中子寿命测量结果间存在**约10秒**的系统差异(**4个标准偏差, 1%**)！

对此疑难的

可能解释：

① 两种实验方法其一或者均低估了系统性误差：**实验方法改进**

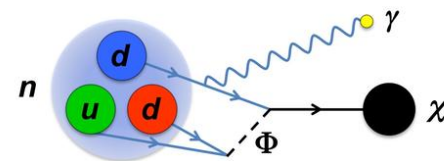
② 存在尚未发现的新物理：**暗物质粒子**

中子存在**未知的激发态**：PRD110,073004 (2024)

PRL120,191801(2018)

PRL121,061801(2018)

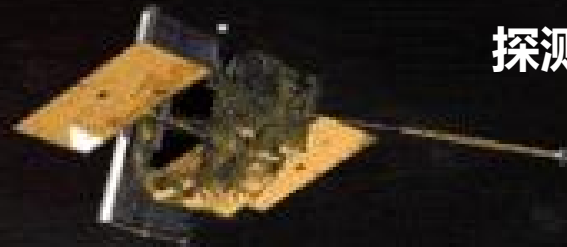
PRL121,022505(2018)



亟需开展具有类似精度、但系统误差不同的独立实验。



中子寿命测量的新尝试：天基测量方法



探测一定高度的反照中子数，
反映了中子寿命

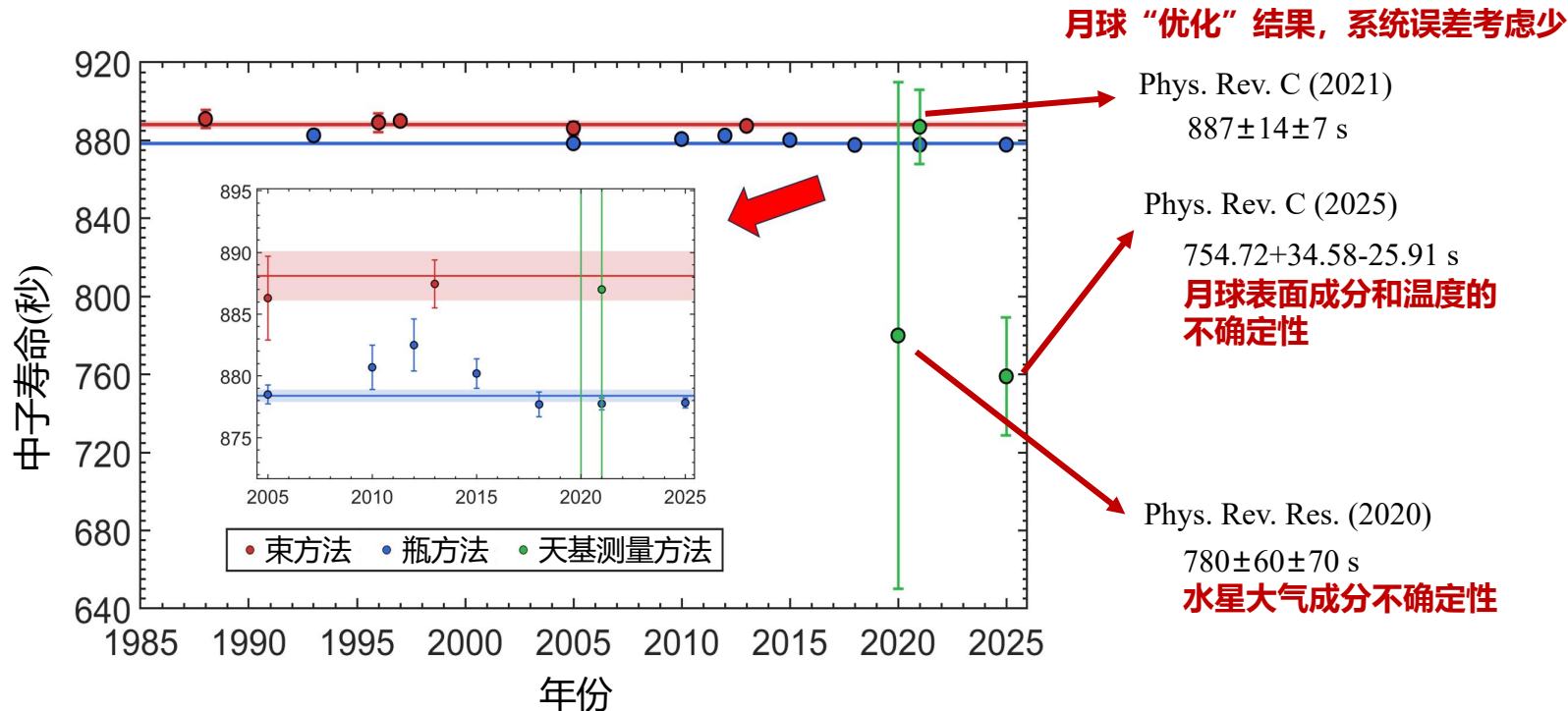
美国航空航天局于2004年为研究水星而发射的一艘太空飞船“信使号”。这一探测器带有中子谱仪——一个探测逃离星球的自由中子的仪器——用于勘探行星表面矿物。

约翰·霍普金斯大学物理学系实验室行星科学家团队首次尝试使用“信使号”2008年飞越水星时传回的中子数据，提取了中子寿命；但行星复杂的地表物质构成、宇宙线通量等产生了太多不确定度。

JGR94, 513-525 (1989); NIMA287, 595-605 (1990); Phys. Rev. Reseach. 2, 023316(2020); Phys. Rev. C 104,045501 (2021)



天基测量结果



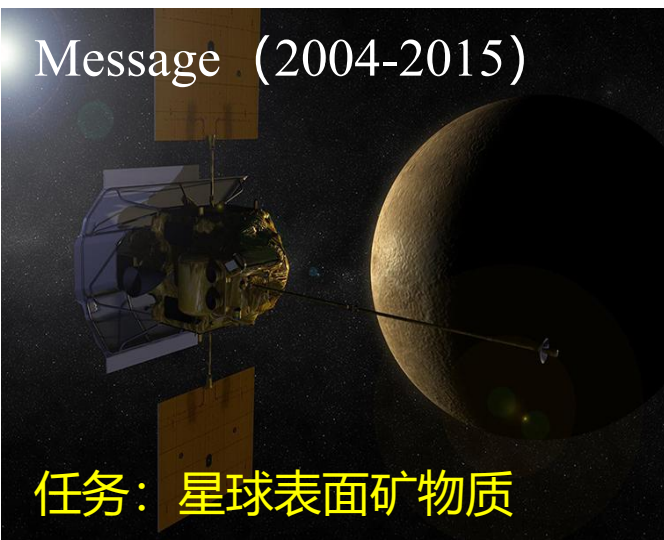
□ **系统误差大：**宇宙线通量、星球模型等不确定度高

□ **大型航天器：**宇宙射线产生中子本底强、电磁干扰

“天基中子寿命测量方案”虽未打破当前中子寿命测量的僵局，但已初步证明了该方法的科学性，具有极大的潜力。

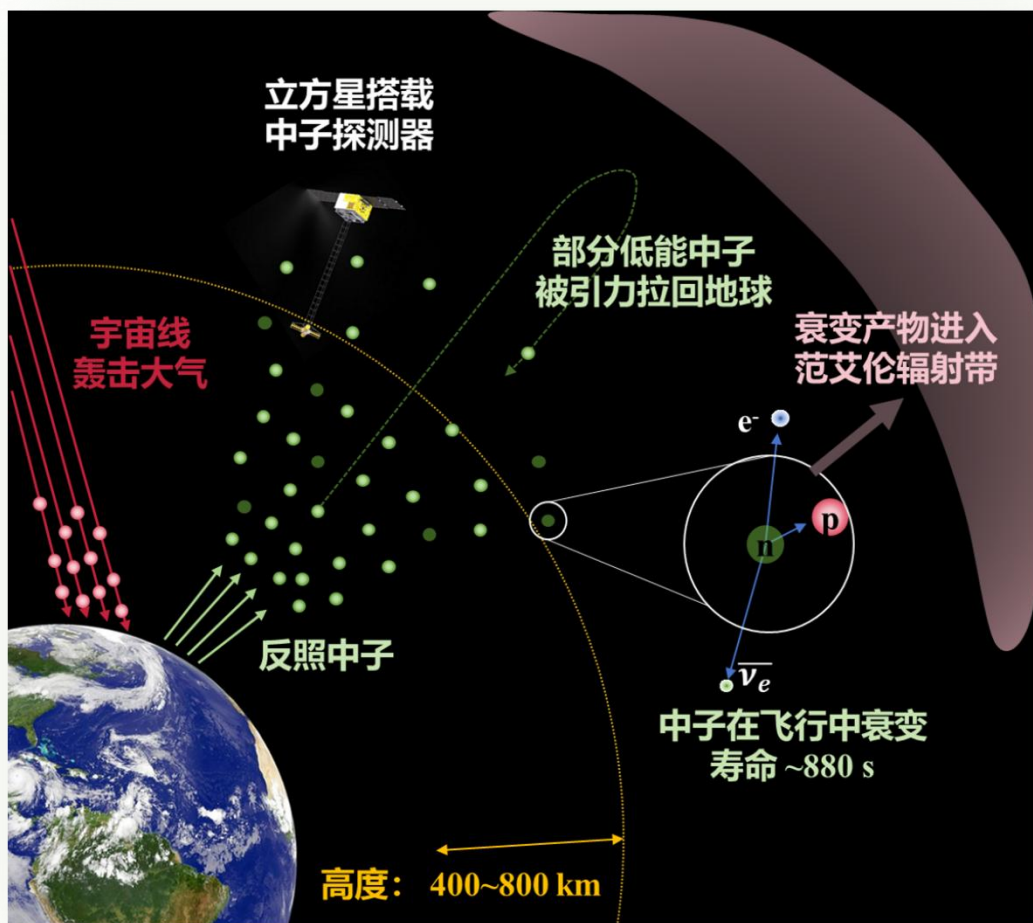
Wilson et al., Phys. Rev. Research. 2, 023316(2020) 水星;

Wilson et al., Phys. Rev. C104,045501 (2021) 月球; Vydula et al., Phys. Rev. C 2501.18831 (2025) 月球



近地轨道的热中子探测 (2022-)

利用**立方星平台**搭载**热中子探测载荷**，直接探测**近地空间的反照热中子通量**，
开展首个近地轨道的中子寿命实验，直接验证范艾伦辐射带的起源



① 地球大气层为天然热中子源

宇宙线轰击大气层，产生中子，在大气中热化
部分中子飞离地球，反照中子

② 星球引力场束缚中子，近地空间为真空管道

反照中子在飞行中发生衰变

③ 利用立方星在300-800 km处探测热中子

高度 ~ 500 km & $v \sim 2.2$ km/s,
飞行时间 ~ 230 s, 衰变率: $\sim 30\%$

测量方案

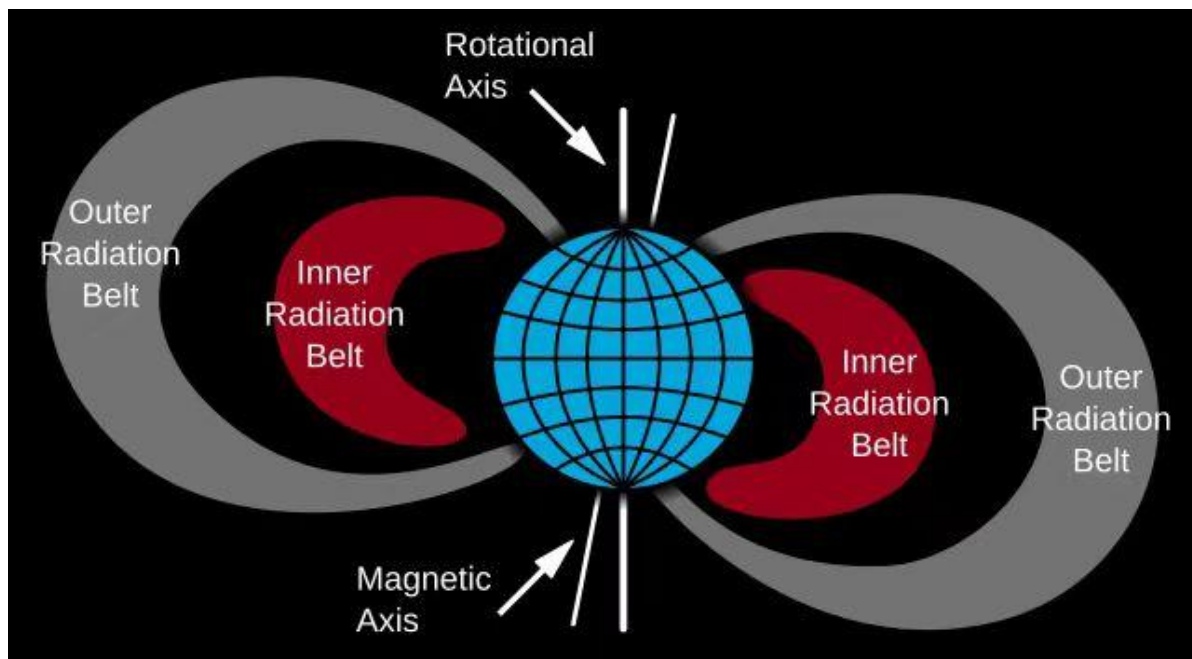
- 高度反映了寿命
- 向上/向下中子比值
- 多轨道同步测量



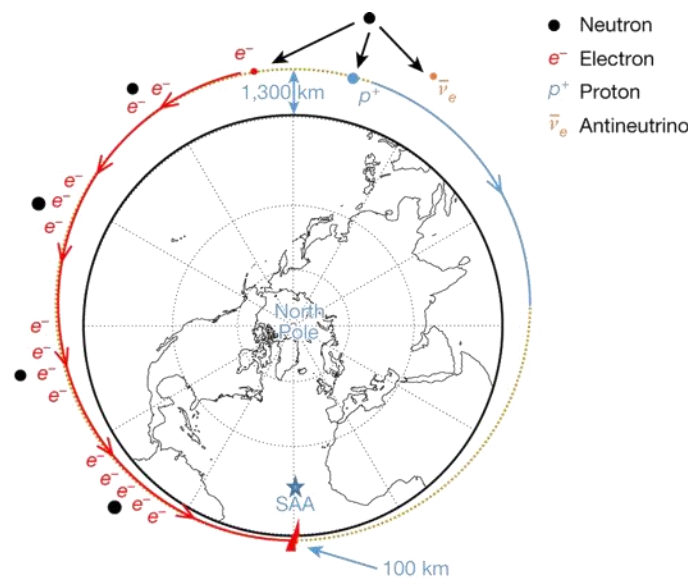
范艾伦辐射带质子起源

——近地空间的反照中子衰变?

Singer, S. Fred. Physical Review Letters 15 (1958): 181



范艾伦辐射带位于地表上方约500至40000公里处，其中充满了受地球磁场捕获的高能质子、电子等



Nature 552, 382–385 (2017)

在范艾伦辐射带的内部边缘附近首次成功探测到了电子的存在，而且电子成分的特征与宇宙射线反照中子衰变假设一致

根据范艾伦辐射带的质子起源理论，近地空间的反照率中子密度估算约为 $2.0 \times 10^{-9} \text{ n/cm}^3$ 。

要彻底验证范艾伦辐射带的形成原理，尚需直接测量近地轨道处的热中子通量。



大尺度多辐射物理场下的极稀有信号探测问题

信
噪
比

□ 稀有信号 ($10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 测量

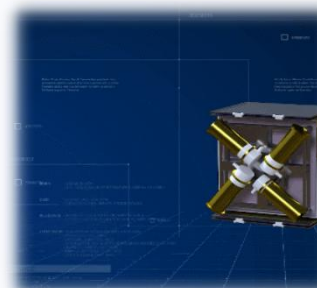
- 热中子流强 v.s. 高能宇宙线+太阳宇宙线+范艾伦辐射带($1 \sim 100 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- 轨道优化设计+轨道精度, 避开高辐射区

□ 卫星平台

- 宇生中子本底: 使用小卫星平台、伸展臂

□ 探测系统: 中子探测效率 v.s. 载荷重量限制

- 低本征辐射本底; 带电粒子、伽马射线抑制或甄别能力; 抗辐射



统
计
误
差

模
型
校
验

□ 星球级中子输运模型 (< 0.5%系统误差)

- 从费米尺度的微观反应到星球级的输运
- 星球级物理场: 磁场+太阳活动+大气 (温度、湿度) +重力场

系
统
误
差

天基测量精度能否达到与地面实验相似的精度? 统计误差 vs 系统误差



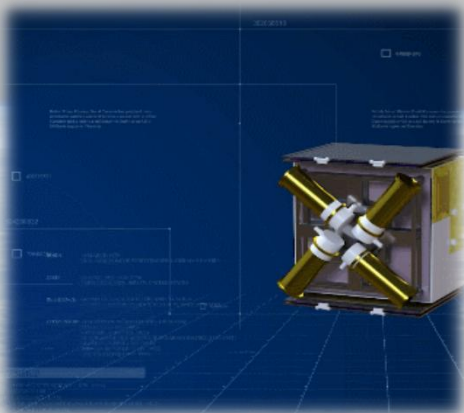
基于立方星的空间实验



地面实验



空间科学实验



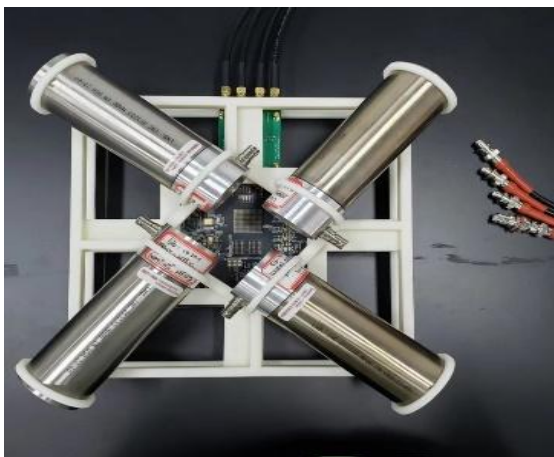
载荷要求

- ◆ 高灵敏、低本底
- ◆ 体积：小型化 ($1U, 10 \times 10 \times 10 \text{cm}^3$)
- ◆ 重量：轻量化 ($< 1 \text{ kg}$)
- ◆ 功耗：总功率 ($< 10 \text{ W}$)
- ◆ 抗辐照



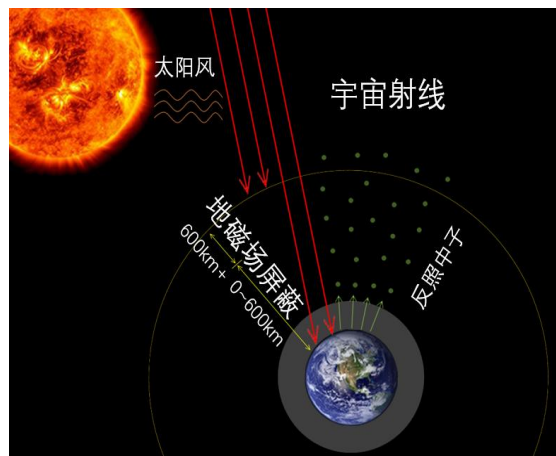
研究内容与评估

◆ 热中子探测载荷



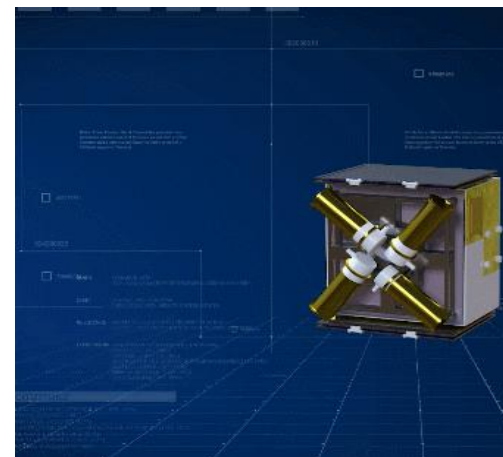
- 低本底探测器研制
- 航天级电子学研制
- 系统集成测试与标定

◆ 反照中子仿真平台



- 星球尺度模型建立
- 中子能谱演化
- 灵敏度分析

◆ 立方星平台



- 伸展臂结构设计
- 姿控、热控设计
- 运行方案设计

评估：若热中子载荷灵敏度为 150 cps/nv

- ◆ 在轨运行1周，为验证范艾伦辐射带中质子起源理论提供直接实验证据
- ◆ 在轨运行1年，可达到3秒的中子寿命测量精度，发展中子寿命天基测量新方法，为破解中子寿命疑难提供独立关键数据

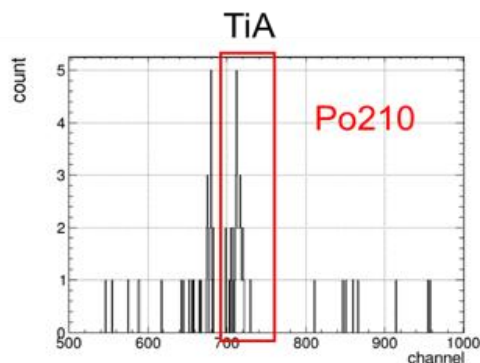
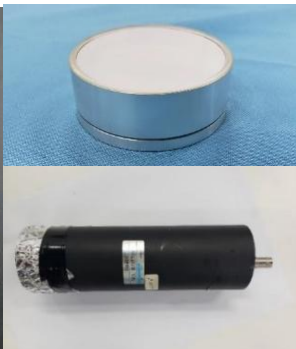
热中子探测载荷：低本底、中子高灵敏、轻质量探测器

- 探测灵敏度/探测器重量 灵敏度 ≥ 150 cps/nv
- 宇宙线 (p , α , γ) 不敏感
- 探测器内秉放射性: α 放射性
 α 本底 $< 4 \times 10^{-7}$ cps/cm²
- 可靠性

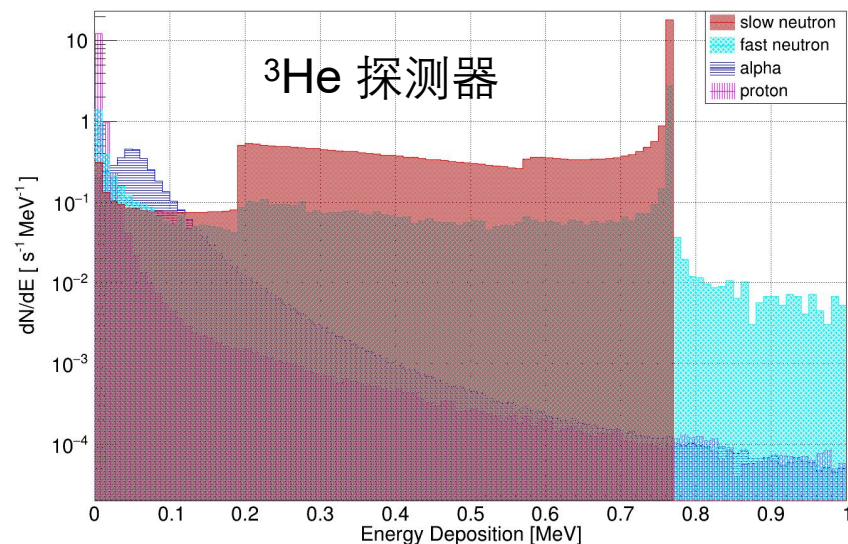
³He-正比管

CLYC、Li玻璃

探测器本底放射性



射线能量沉积对比



- 依托锦屏深地实验室筛选低本底材料
- 通过抛光、清洗等工艺降低表面发射率
- 利用Geant4模拟优化探测器气压与布局



航天级电子学研制

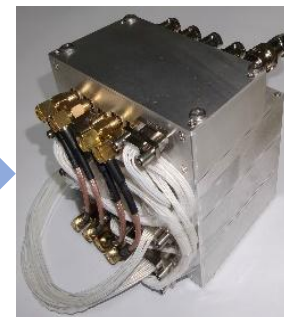
电子学需求：高可靠性、抗辐照性能、低功耗、粒子鉴别

- 功耗、体积、重量限制 $< 10\text{ W}$, $< 1\text{U}$, $< 1\text{ kg}$
- 多通道波形采样与粒子鉴别 采样率 $\geq 50\text{ MSPS}@14\text{bit}$
- 紧凑型多通道前置放大器 增益 $> 3\text{ mV/fC}$
- 极低纹波可调高压 输出 $0 \sim 2000\text{ V}$, 纹波 $\leq 0.1\%$
- 抗辐照

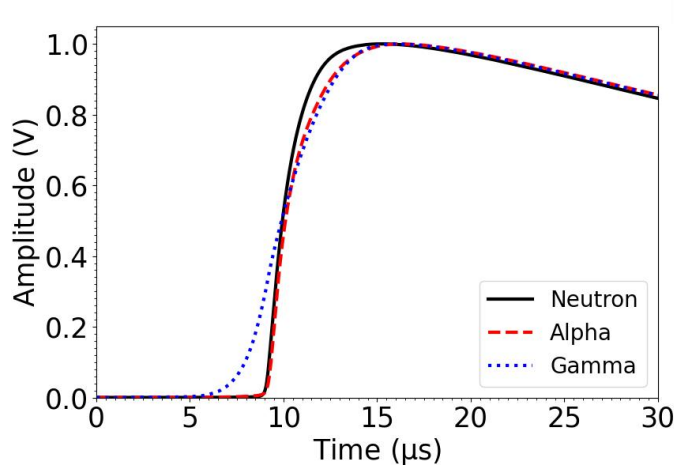
多通道前放



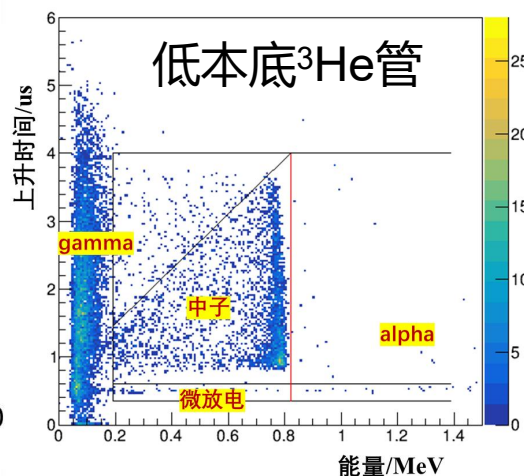
数据采集卡



整机电子学系统



中子、 γ 和 α 归一化波形对比图



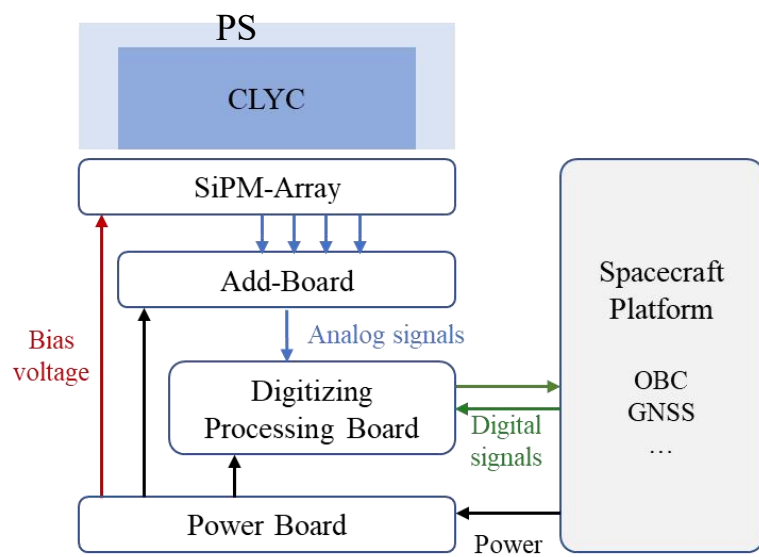
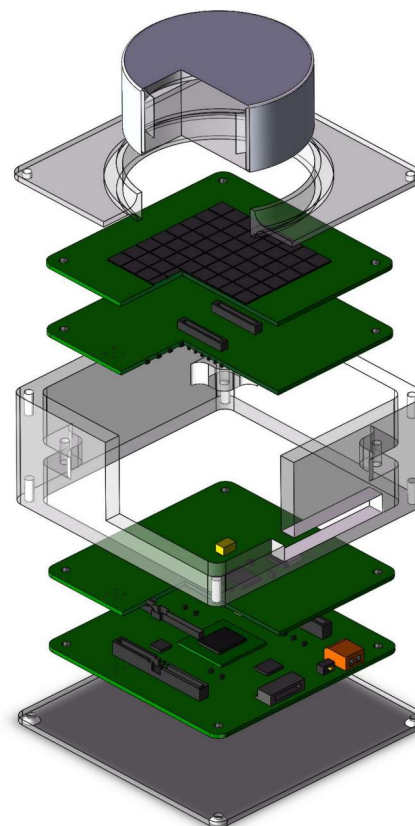
幅度 - 上升时间鉴别谱

- 低功耗、集成化、版本迭代
- 波形甄别算法 + 温漂校正算法
- 高压模块选型与测试
- 芯片选型 + 硬件防护/备份 + 软件加固

刘志君等, in review

CLYC-PS Phoswich module

- Neutron detector :CLYC(95% 6Li)
 $\Phi 50 \times 15 \text{mm}$;
- VETO: 5mm Plastic Scintillator;
- SiPM array + 125Msps, 14-bit readout;
- 0.7 kg, 1.8 W, 0.7 U



齐浩天等, in preparation

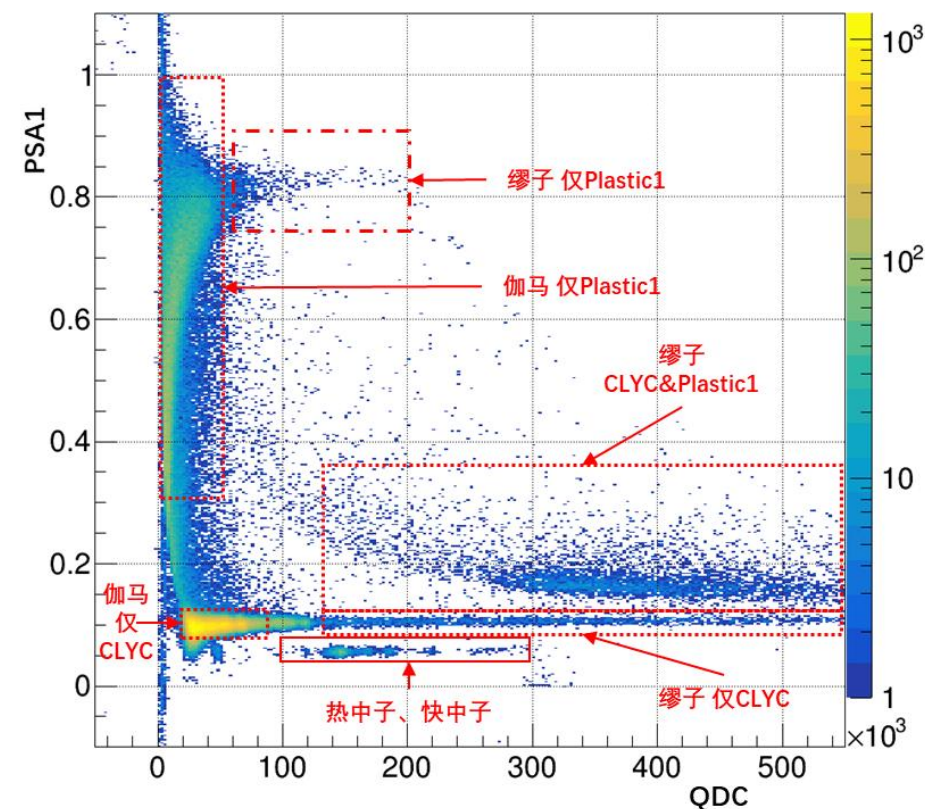
➤ 能量分辨: 14% @ 662 keV

➤ n/γ FoM = 1.4

➤ γ/μ FoM = 1.0

➤ 热中子灵敏度: 12 cps/nv

➤ α 本底: $\sim 2 \text{ h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$

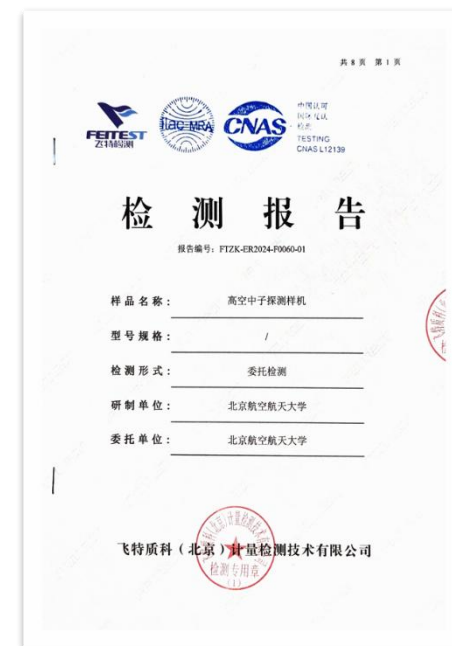
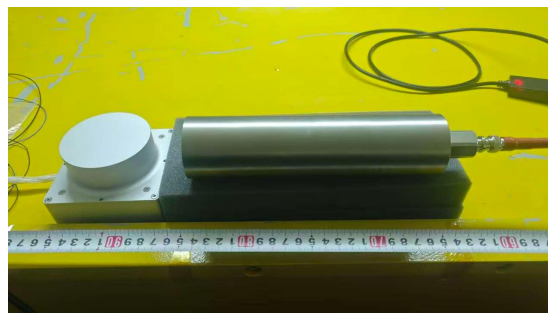
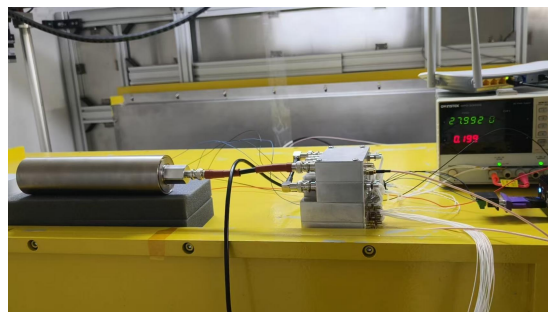
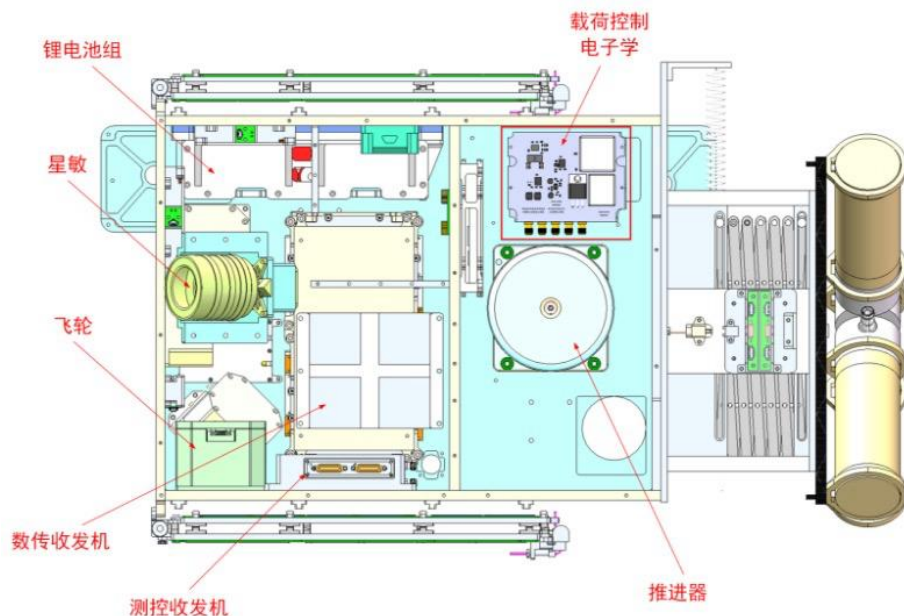




热中子探测载荷：系统集成测试与标定

集成测试需求：

- 各模块的电气与结构整合
- 探测效率标定及本底抑制评估
- 测控稳定性与功能稳定性
- 力学性能、热学性能、真空安全性
- 舱外主动热控设计与测试



- 整机地面标定实验
- 卫星平台联调测试
- 环境适应性测试
- 利用飞艇、卫星等搭载开展综合测试

齐浩天等

历程与规划

北航亚太一号



2021.11

电子学



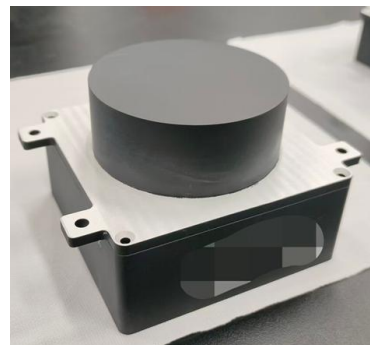
2022-

低本底探测器



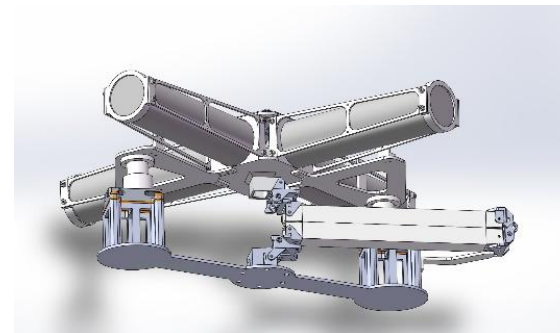
2023-2025

CLYC-PS中子探测器

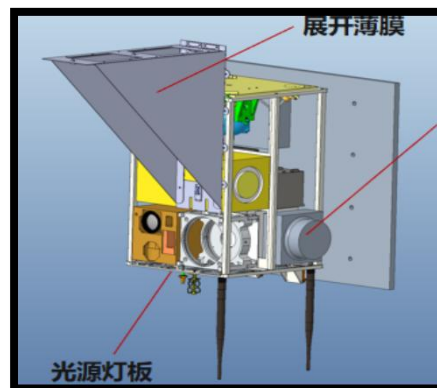


2026 -

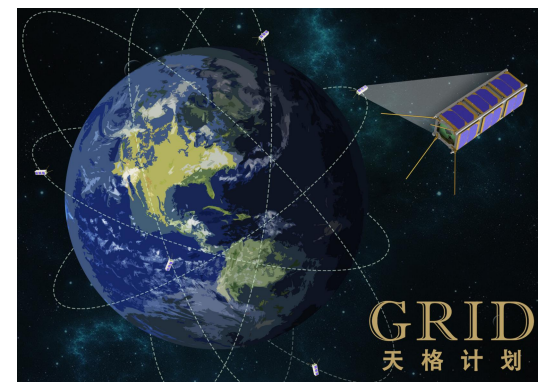
氦-3中子探测器



2023, 世界大学生立方星挑战赛中国赛区金奖
2024, 北航敢为项目
2025, 基金委原创探索计划项目



“牵星”立方星、超低轨卫星
(北航)

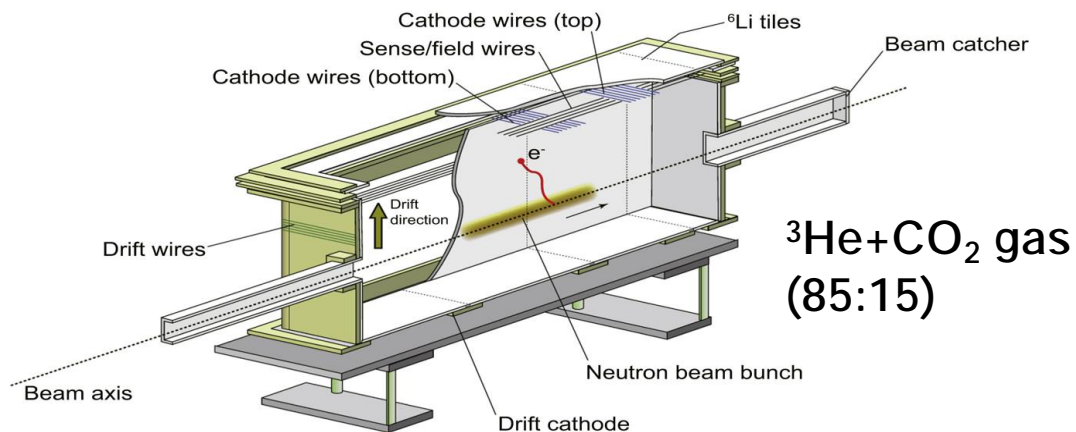


天格 (清华等)
紫丁香微纳卫星 (哈工大)



KEK开展的中子寿命测量 (2015-)

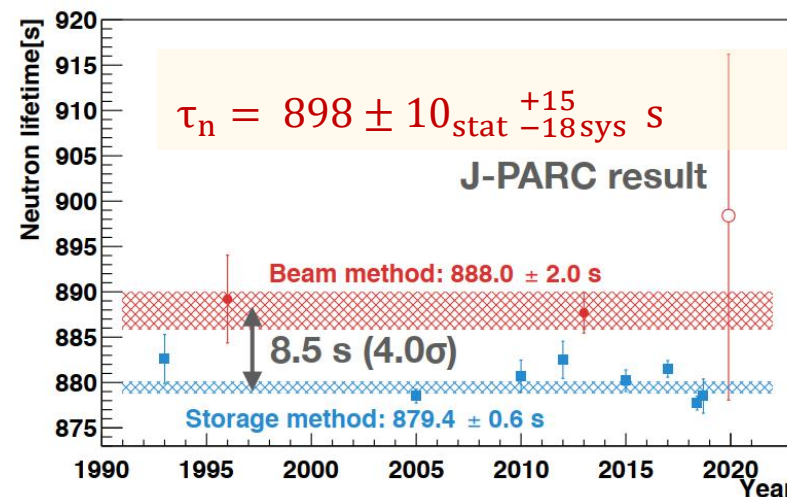
Y. Arimoto, et al. NIMA, 799, 2015, 187-196



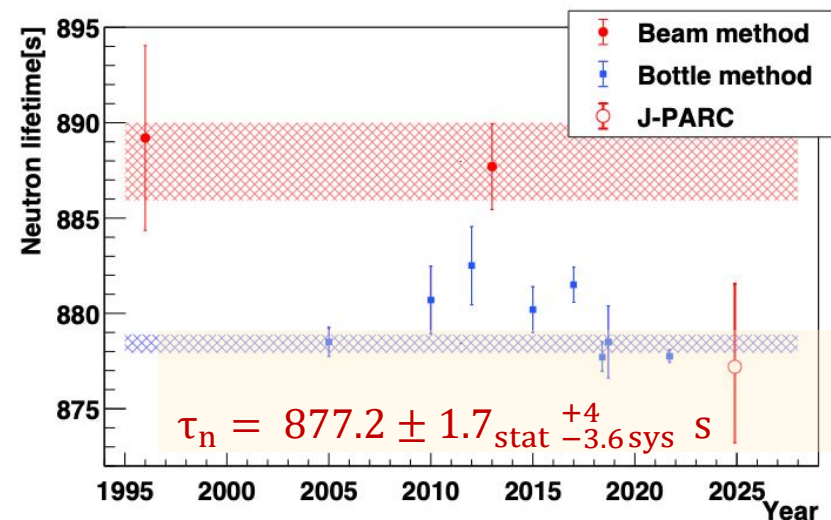
用于中子寿命测量的时间投影室@J-PARC

- ✓ 冷 ($\sim 1\text{km/s}$) 中子、脉冲束 ($1.7 \times 10^6 \text{ n/s}$, 脉冲降低本底100倍)
- ✓ 低放射性材料筛选+本底屏蔽+宇宙线反符合 (200->2 cps)
- ✓ 同一探测器: 实现电子及中子的探测, $n(^3\text{He}, p)t$
直接测量中子衰变释放的电子能谱 (联合漂移时间)

2020年 Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 123C02



2024年 arXiv:2412.19519v1



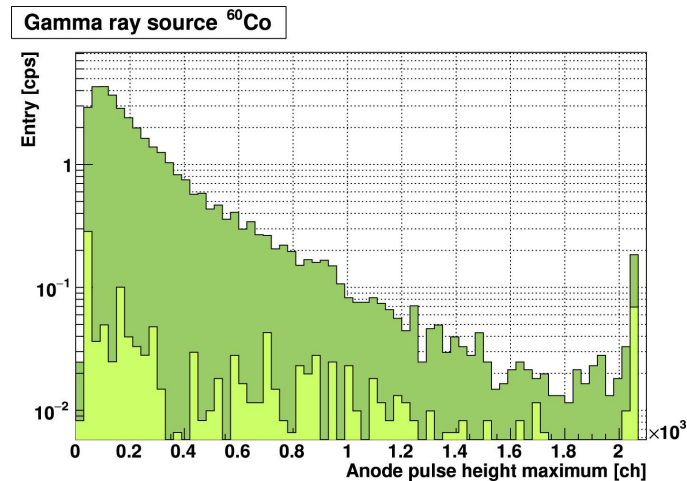
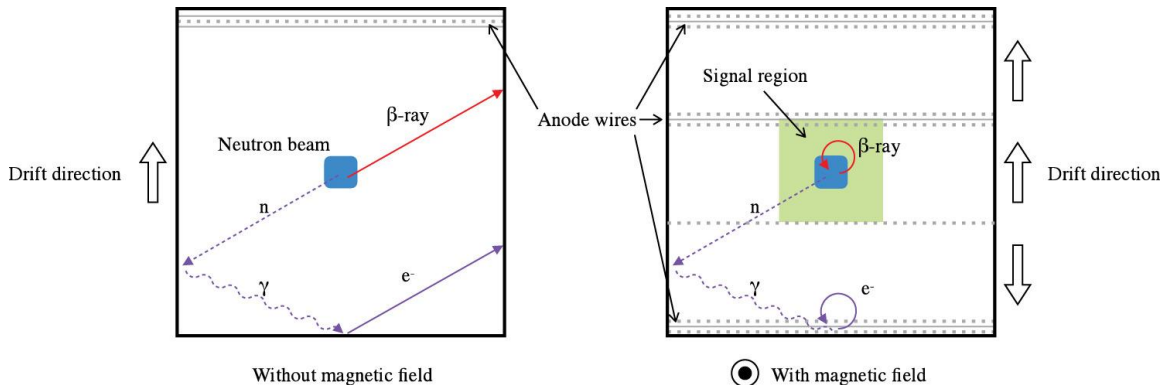
中子通量
气体压强
本底模拟
实验统计
.....

χ^2/NDF 为15.83/3, 远大于1



J-PARC开展的中子寿命测量：改进技术，降低本底事件率

Naoyuki Sumi, et al. NIMA, 1045, 2023, 167586



使用磁场后，本底被抑制到3%

用于中子寿命测量的时间投影室@J-PARC

问题：

中子被探测器壁或者工作气体俘获\散射，产生伽马射线，进一步产生的本底污染信号（电子）

改进：

引入螺线管磁场，限制电子位置
使用多层时间投影室，提高定位精度

2024年01月，初步的3 h测试中，（未考虑系统误差）

$$\tau_n = 882 \pm 78 \text{ s}$$

后续实验（计划2025年12月）的目标精度为1 s，计划运行30天。

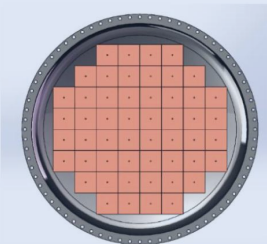
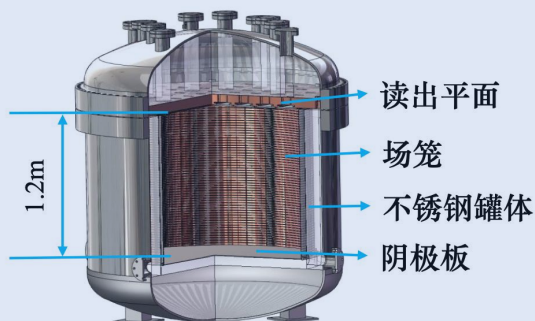


基于CSNS-TPC探测器的中子寿命测量?

- 束流：冷中子、脉冲束
- 国内利用时间投影室技术在稀有事例探测方向已经走在世界前列

对粒子能量与轨迹的三维高精度重建（机器学习），有效甄别信号与本底；探测阈值低，灵敏度高；材料放射性控制；大面积工程实践；反符合技术... ..

PandaX-III

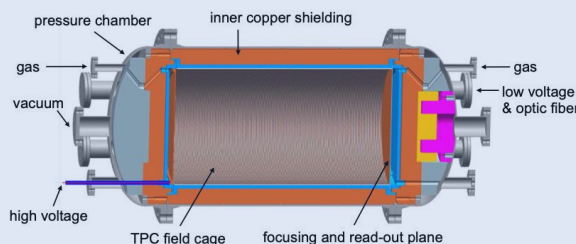


组成读出平面的
52块Micromegas阵列

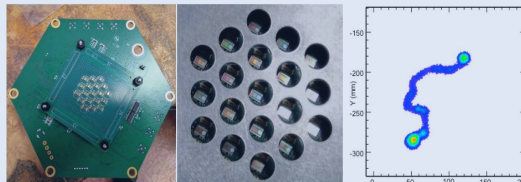
3% 能量分辨率@ 2.459 MeV
低放射性
高增益长时间稳定运行
@ 10 bar

PRL136, 162501(2026)

NvDEX-100



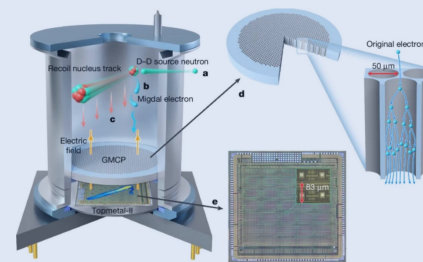
Top Metal 读出



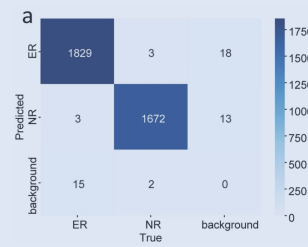
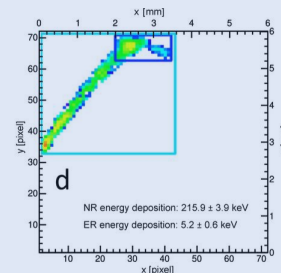
低放射性：0.05 evts / yr @ 0vDBD ROI

arXiv: 2304.08362

MARVEL



GMCP+TopMetal-II



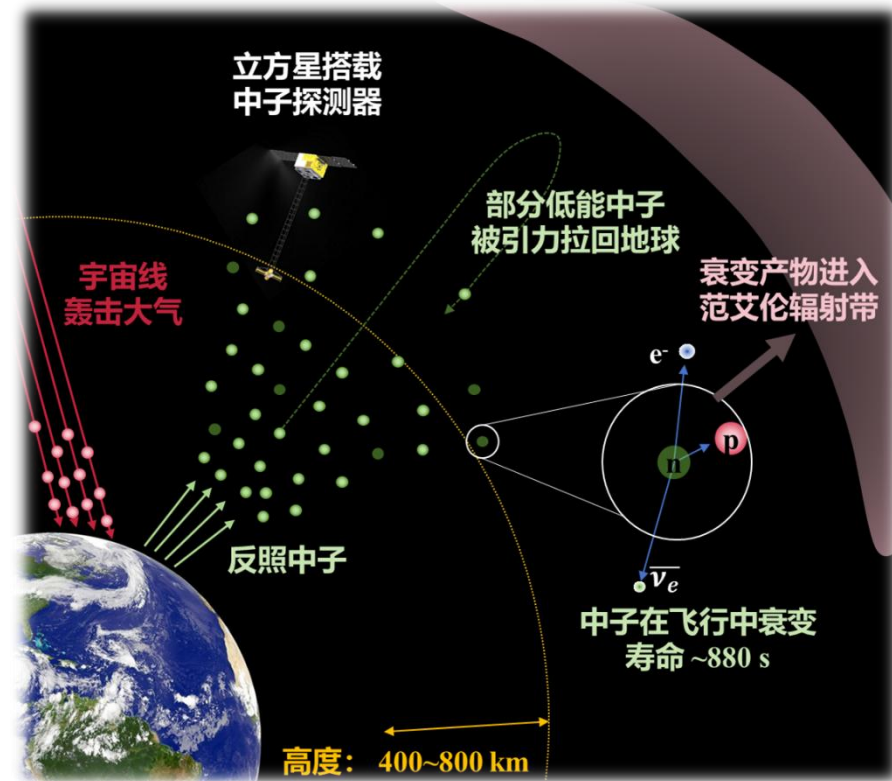
基于YOLOV8的粒子鉴别应用

Nature 649, pages 580–583(2026)

可以用于开展中子超越标准模型的实验检验

总结

- ◆ 中子的精确寿命是物理学和宇宙学中的基本参数
- ◆ 当前最精确的实验间存在着系统偏差
- ◆ 在近地轨道开展中子寿命测量实验：
 - 低本底、高灵敏的热中子探测技术
 - 多物理场耦合的反照中子模拟方法
- ◆ 基于CSNS可以考虑开展基于TPC的实验方案



谢谢!



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY

中子寿命测量

致谢:

北航: 周小鹏、齐浩天、杨栩森、刘志君、陈朝敏、钱凯

北师大: 张春雷



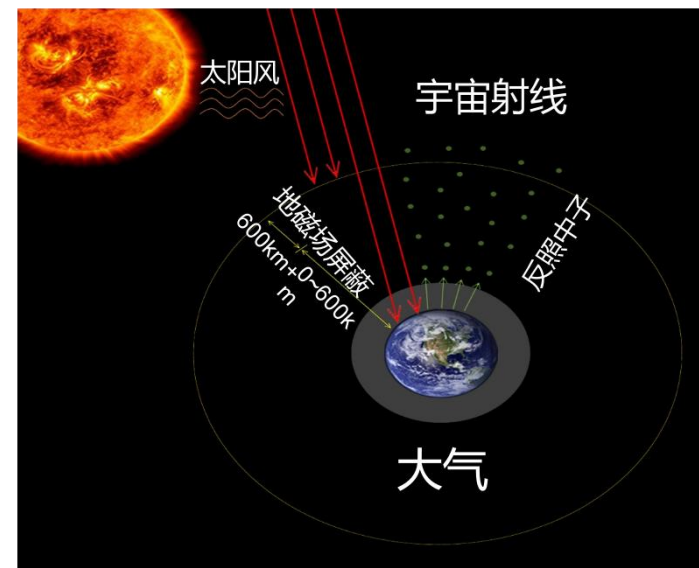
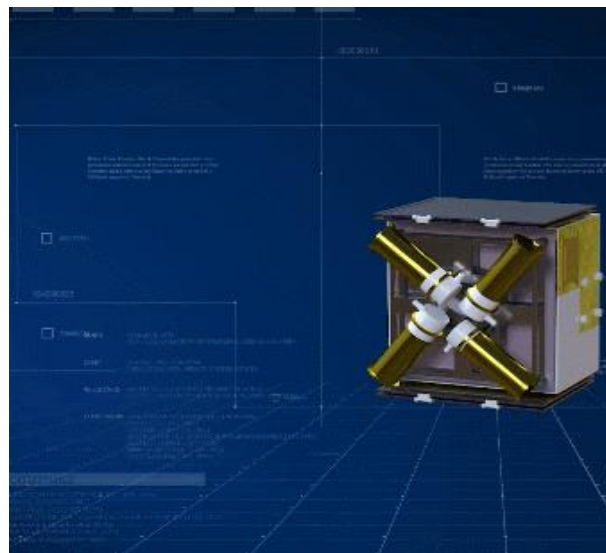
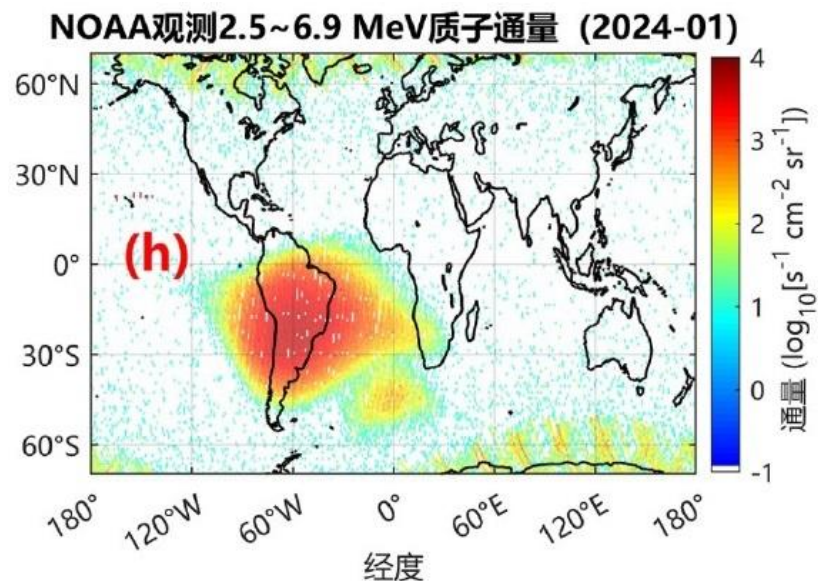


研究方案优势

依托地球引力场和天然真空，具有与地面实验完全不同的系统误差；

与以往天基中子实验相比，具有以下**明显优势**：

- ◆ **近地轨道测量**：具有成熟的搭载和运行机制，规划卫星轨道，避让高辐射区
- ◆ **小型航天器搭载**：次生中子少，地球轨道发射成本低；伸展臂
- ◆ **系统误差评估**：地球大气、磁场模型发展充分
- ◆ **中子探测方案**：中子、带电粒子、伽马射线甄别能力，提升信噪比



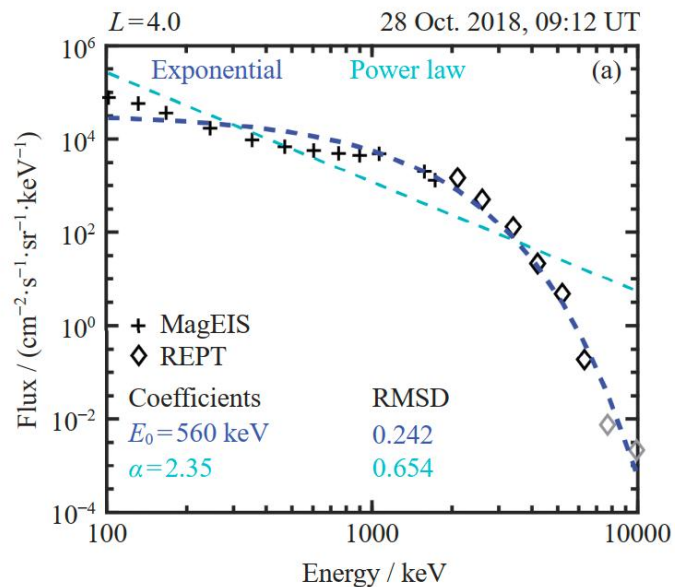


关键问题：大尺度多辐射物理场下的极稀有信号探测

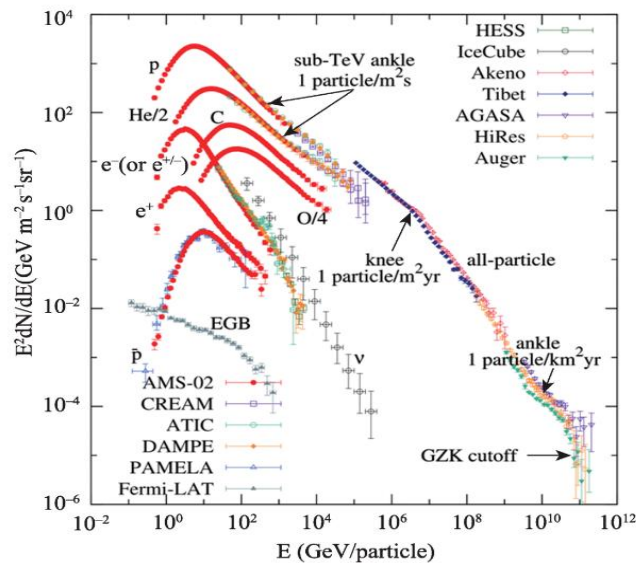
① 热中子流强 v.s. 范艾伦辐射带+高能宇宙线 + 太阳宇宙线

A few $10^{-3}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

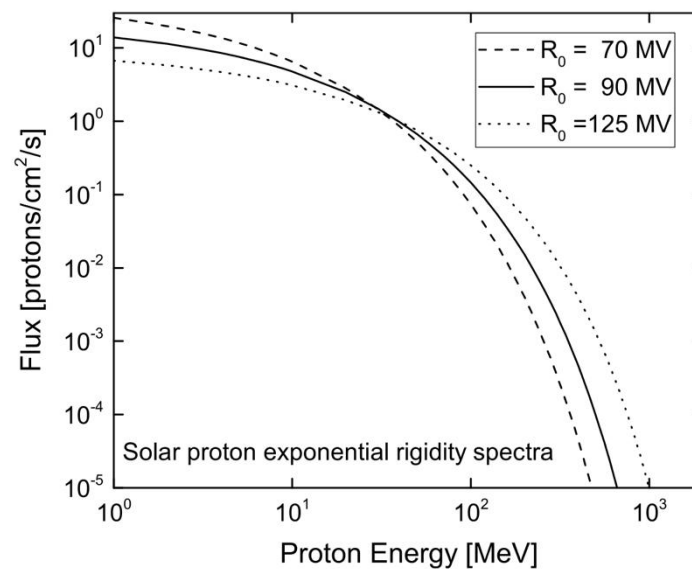
$100/\text{cm}^2/\text{s}$



范艾伦辐射带



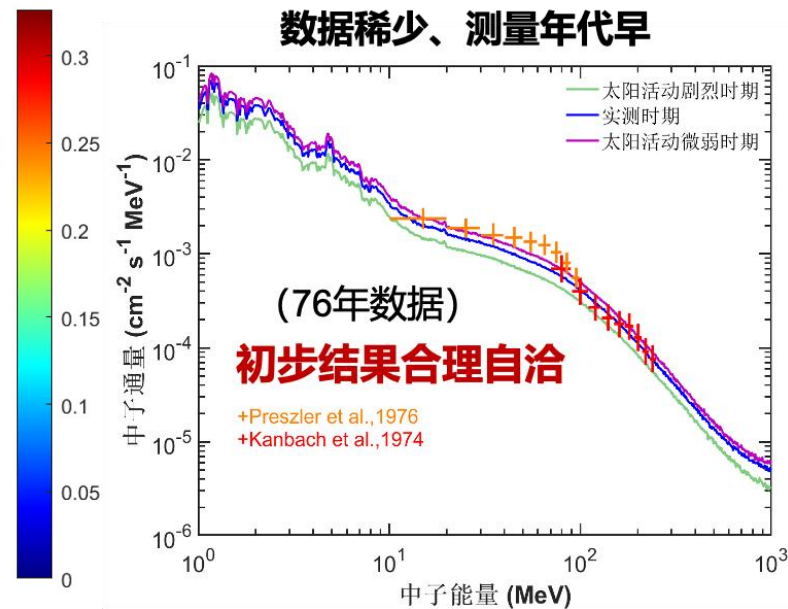
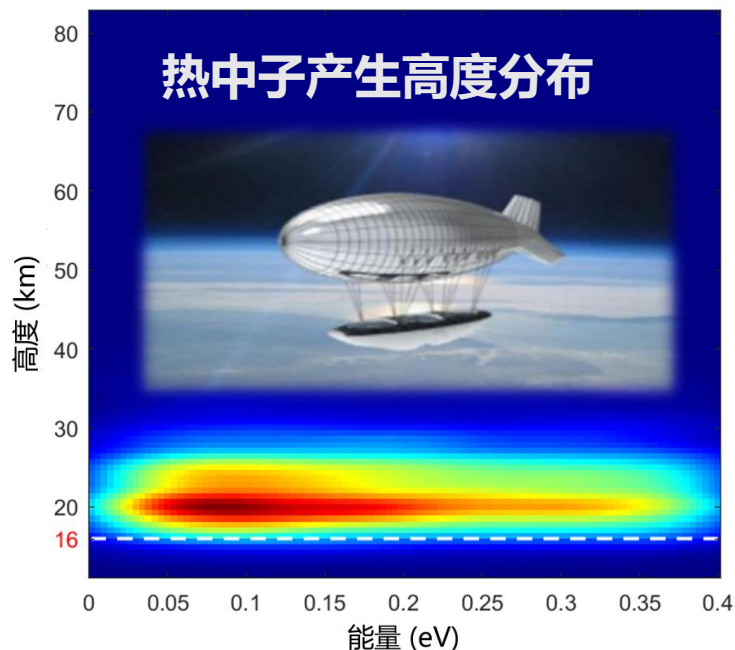
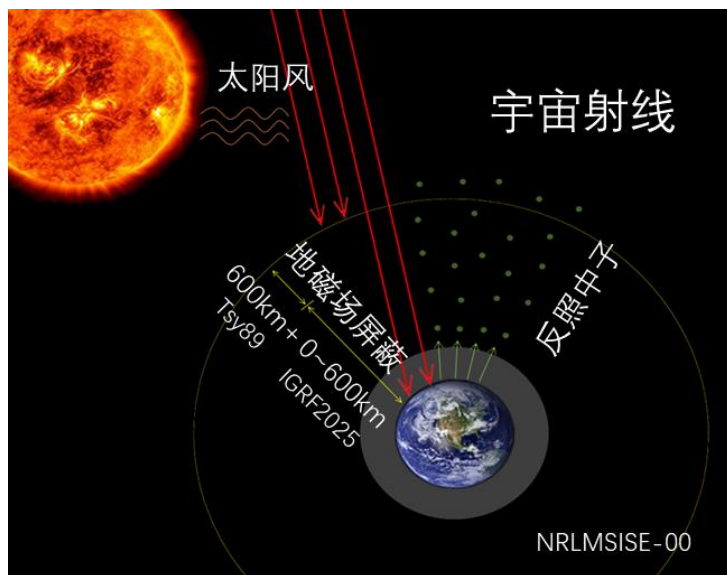
银河宇宙射线



太阳宇宙线

反照中子仿真平台：星球尺度模型建立

建立从粒子相互作用到地球尺度全链条模拟(10^{-15} - 10^7 m, 10^{-2} - 10^8 eV)



- ◆ 宇宙射线：原位测量数据 精确
- ◆ 太阳活动：太阳调制参数 精确
- ◆ 地球场：地磁截止刚度、重力场 精确
- ◆ 大气：大气成分、温度、季节性 较为精确
- ◆ 物理过程：簇射、核反应 足够精确
- ◆ 模拟计算量大：方法加速、超算 精确

➤ 近地轨道处反照中子产生于16-30 km内，天气地貌等影响可忽略

利用已有数据，校验仿真精度

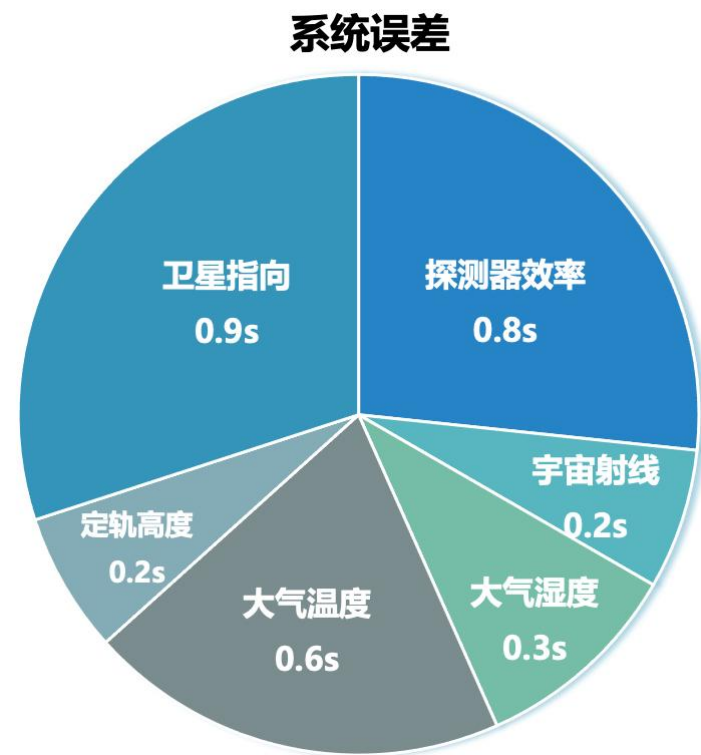
反照中子仿真平台：寿命精度初步评估

若载荷灵敏度为150 cps/nv，在轨运行1(3) 年，误差为 3 (2) s；

此时统计误差为2.7 (1.6) s，与束方法相当。

若载荷灵敏度1000 cps/nv，在轨运行一年，误差降为 1.9 s。

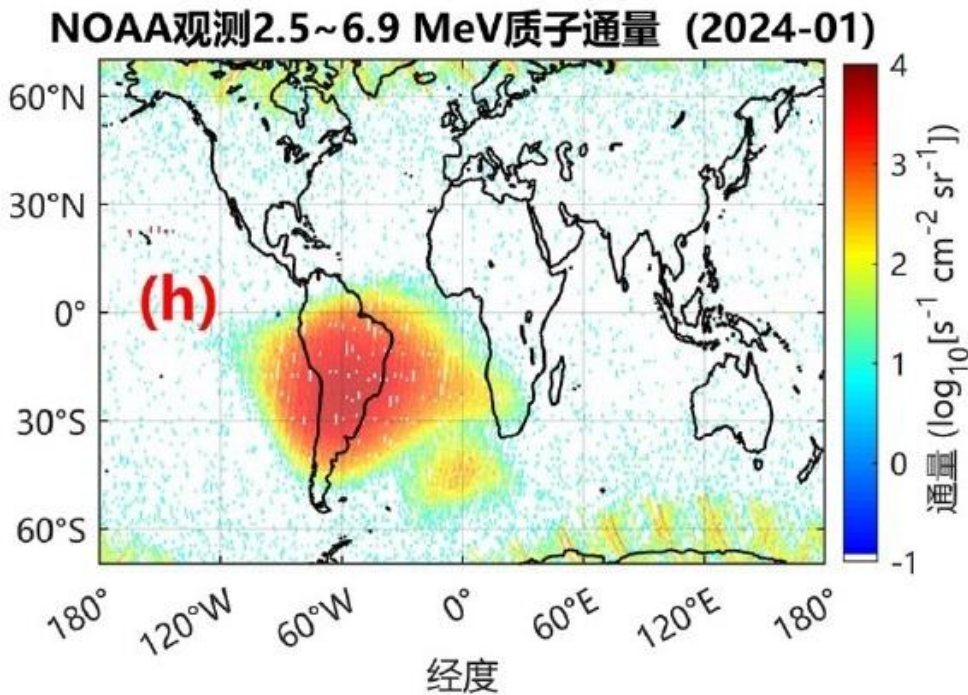
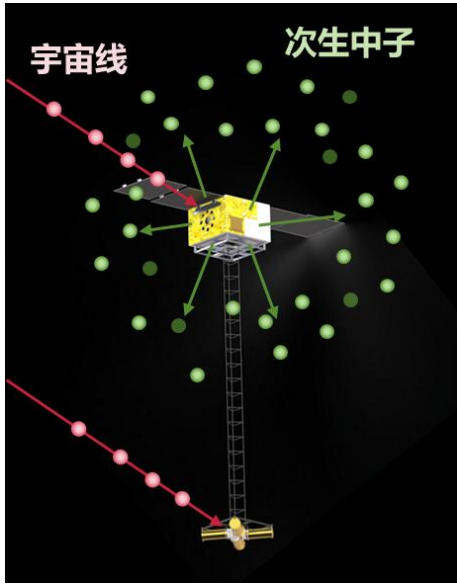
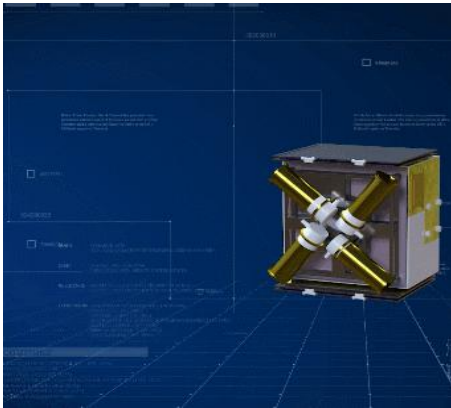
误差成分	时间(s)	来源
统计误差	1.3	统计涨落
系统误差	1.4	
探测器效率	0.8	^3He 管效率误差
宇宙射线	0.2	探测数据误差
大气湿度	0.3	每日湿度变化
大气温度	0.6	每日温度变化
定轨高度	0.2	高度精度100m
卫星指向	0.9	指向精度0.3°



立方星平台和运行方案设计

科学任务需求:

- 抑制次生中子本底



Sci. China Earth Sci., 68, 3776-3788(2025).

次生中子与待测中子对比

	国际空间站	月球勘探者	立方星
质量/kg	$\sim 4.2 \times 10^5$	1523	20
待测中子/次生中子	$\sim 10^{-1}$	$\sim 10^2$	$\sim 10^4$
探测器位置	舱内/舱壁	2.5 m 伸展臂	0.5 m 伸展臂

- 采用立方星平台，并配置 ≥ 0.5 米长度的伸展机构
- 利用Geant4模拟，评估本底抑制效果
- 采用低倾角近地轨道，避开南大西洋异常区和南北极
- 配备推进装置，实现100 km级变轨



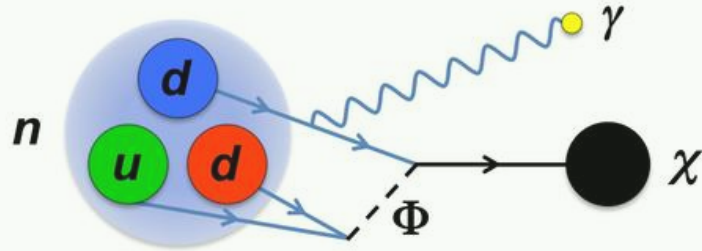
New physics proposed to solve the lifetime puzzle

SM: the branching fraction (Br), dominated by β decay, is 100%.

Ideas to account for the missing 1% in the bottle method !

➤ PRL 120, 191801 (2018)

new dark decay channel



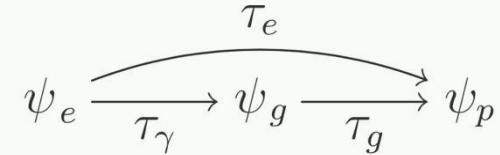
$$\tau_n^{\text{beam}} = \frac{\tau_n}{\text{Br}(n \rightarrow p + \text{anything})}$$

❑ the existence of a dark decay channel

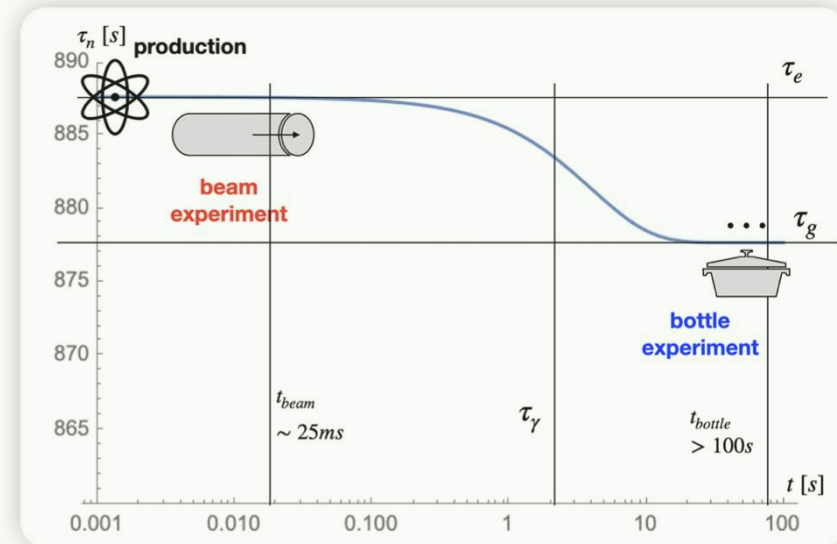
❑ two different scenarios :

- (a) $n \rightarrow \text{invisible} + \text{visible}$; PRL121,061801(2018)
PRL121,022505(2018)
- (b) $n \rightarrow \text{invisible}$:
.....

➤ PRD 110, 073004 (2024)



existence of the excited state



Excited state

Ground state

$$t_{\text{beam}} \ll \tau_\gamma \ll t_{\text{bottle}} < \tau_g < \tau_e,$$